



Kajian Desain Kelaiktabrakan Pesawat Terbang

A Review of Aircraft Crashworthiness Design

Annisa Jusuf^{*1)}, Afdhal¹⁾, dan Minda Mora²⁾

¹Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung, Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

²Pusat Penelitian dan Pengembangan Transportasi Udara, Kementerian Perhubungan RI Jl. Medan Merdeka Timur No. 5, Jakarta Pusat 10110, Indonesia

email: annisajusuf@ftmd.itb.ac.id

INFO ARTIKEL

Histori Artikel:

Diterima: 15 Agustus 2016

Direvisi: 5 September 2016

Disetujui: 27 September 2016

Keywords:

aircraft, crashworthiness, subfloor, crash box.

Kata kunci:

pesawat terbang,
kelaiktabrakan, *subfloor*, *crash box*

ABSTRACT / ABSTRAK

Air traffic in Indonesia is experiencing a positive trend in recent years. The increase in the frequency of aircraft operation might particularly increase the possibility of accidents occurrence. Aircraft crashworthiness concept becomes an important matter that need to be considered in order to prevent structural damage and injuries to the passengers. Aircraft structural crashworthiness design is developed in the aircraft preliminary design phase which is, later, integrated into the overall aircraft design process. Aircraft subfloor structure is the part of the aircraft that is used to restrain the kinetic energy of a collision in the case of vertical loading on the aircraft. Subsequently, crash box is a component of the subfloor that will absorb collisions kinetic energy by turning it into plastic deformation.

Lalu lintas penerbangan di Indonesia mengalami tren peningkatan dari tahun ke tahun. Peningkatan frekuensi penggunaan pesawat terbang tentunya akan meningkatkan kemungkinan kejadian kecelakaan. Konsep kelaiktabrakan pesawat terbang menjadi hal penting yang perlu mendapat perhatian untuk mencegah kerusakan struktur dan cedera pada penumpang. Desain kelaiktabrakan struktur pesawat berada pada tahapan desain awal yang terintegrasi kedalam proses desain pesawat secara keseluruhan. Struktur *subfloor* pada pesawat terbang menjadi bagian yang digunakan untuk menyerap energi kinetik tabrakan dalam kasus pembebanan vertikal pada pesawat terbang. *Crash box* merupakan komponen pada *subfloor* yang akan menyerap energi kinetik tabrakan dengan mengubahnya menjadi deformasi plastis.

PENDAHULUAN

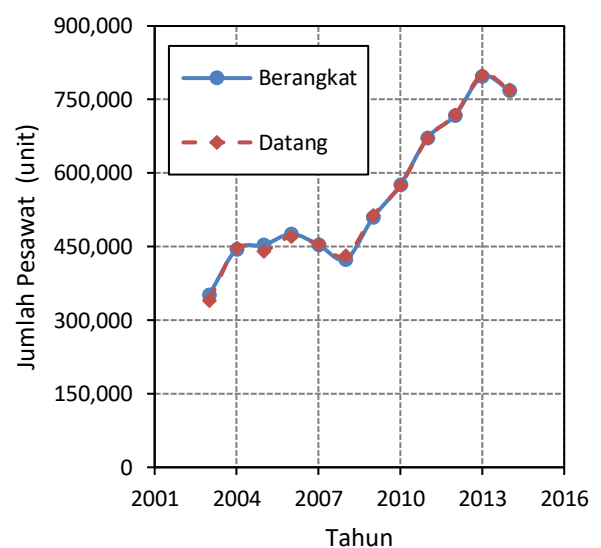
Penerbangan adalah satu kesatuan sistem yang terdiri atas pemanfaatan wilayah udara, pesawat udara, bandar udara, angkutan udara, navigasi penerbangan, keselamatan dan keamanan, lingkungan hidup, serta fasilitas penunjang dan fasilitas umum lainnya [1]. Kegiatan penerbangan memiliki kaitan yang erat dengan kebutuhan mobilitas manusia di suatu negara. Di Indonesia, penerbangan memiliki tujuan langsung dengan usaha memperlancar pertumbuhan ekonomi, menunjang, menggerakkan, dan mendorong pencapaian tujuan pembangunan nasional.

Secara lebih spesifik, pesawat terbang sebagai salah satu jenis pesawat udara yang menjadi bagian dari suatu sistem penerbangan yang memiliki karakteristik sebagai pesawat udara yang lebih berat dari udara, bersayap tetap, dan dapat terbang dengan mesin sendiri [1]. Pertumbuhan lalu lintas dan penggunaan pesawat terbang di Indonesia telah mengalami peningkatan yang pesat seperti tergambar pada Gambar 1. dan Gambar 2. Pada rentang tahun 2003 hingga 2014 telah terjadi peningkatan lalu lintas penerbangan dalam negeri Indonesia sebesar 118% untuk jumlah pesawat pada keberangkatan dan 126% untuk kedatangan. Untuk jumlah keberangkatan penumpang seperti disajikan pada Gambar 2, pada rentang tahun 1999 hingga 2014 telah terjadi peningkatan jumlah penumpang sebesar 916% untuk dalam negeri dan 248% untuk luar negeri [2].

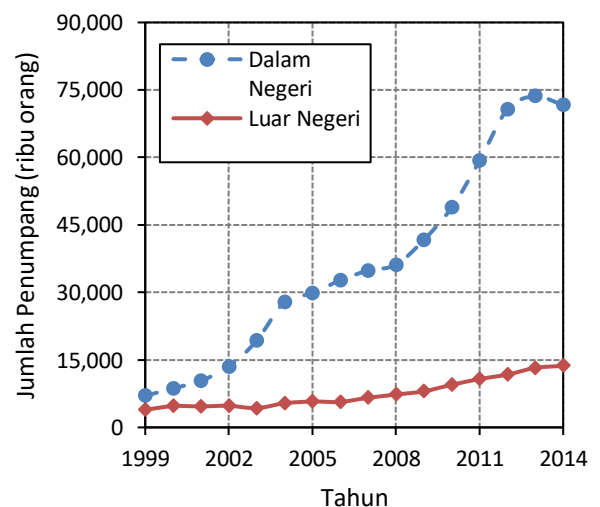
Frekuensi penggunaan pesawat terbang yang semakin tinggi di Indonesia tentunya menimbulkan peluang untuk terjadinya kecelakaan yang lebih tinggi. Desain kelaiktabrakan (crashworthiness design) dari pesawat terbang menjadi parameter penting dalam hal ini. Dalam survey pasar pesawat terbang tahun 1995 [3] diketahui bahwa keamanan (safety) merupakan isu utama yang paling diperhatikan oleh pilot dan penumpang pesawat pada penerbangan umum. Konsep keamanan sendiri pada dasarnya dikategorikan kedalam dua hal, yakni pencegahan kecelakaan (accident prevention) dan mitigasi cedera (injury mitigation). Pencegahan kecelakaan merupakan suatu usaha pengontrolan dan meminimalan dari faktor-faktor yang dapat

menimbulkan kecelakaan, sedangkan mitigasi cedera merupakan usaha pengontrolan dan meminimalan faktor-faktor yang dapat menimbulkan cedera ketika kecelakaan terjadi. Desain kelaiktabrakan tergolong kepada kategori mitigasi cedera dalam upaya meminimalkan cedera yang dialami ketika terjadi kecelakaan.

Artikel ini ditujukan untuk melakukan kajian tentang desain kelaiktabrakan pesawat terbang. Konsep-konsep tentang manajemen energi tabrakan juga akan dijelaskan, agar diperoleh gambaran tentang desain kelaiktabrakan yang diaplikasikan pada pesawat terbang.



Gambar 1 Lalu lintas penerbangan dalam negeri Indonesia Tahun 2003-2014 [1]



Gambar 2 Jumlah Keberangkatan Penumpang Dalam dan Luar Negeri di Indonesia Tahun 1999-2014 [2]

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Kelaiktabrakan

Kelaiktabrakan (crashworthiness) merupakan suatu kemampuan dari struktur kendaraan untuk berdeformasi dengan gaya yang terkontrol dan memberikan ruang yang cukup untuk penumpang sehingga membatasi kemungkinan cedera selama peristiwa tabrakan terjadi. Pengontrolan gaya dapat dilakukan dengan membatasi perlambatan (deceleration) dengan jarak yang tersedia selama terjadi peristiwa tabrakan.

Tujuan dari suatu konsep desain laik tabrak adalah [3]:

1. Menghilangkan peluang cedera atau korban jiwa pada kejadian tabrakan ringan
2. Meminimalisir cedera dan korban jiwa pada kejadian tabrakan berat
3. Meminimalisir kerusakan pada struktur pesawat terbang pada semua kejadian tabrakan

Ketiga tujuan dari suatu konsep laik tabrak tersebut jika lebih disederhanakan akan menuju kepada pencapaian keamanan pada penumpang, menurunkan kemungkinan cedera, dan melindungi penumpang dari dampak yang diakibatkan oleh tabrakan.

Selanjutnya, untuk mencapai tujuan dari suatu konsep pesawat terbang yang laik tabrak maka terdapat beberapa prinsip yang bisa dijadikan landasan. Prinsip dasar dari suatu desain laik tabrak dikenal dengan CREEP [3].

1. *Container* (Tempat Penumpang)
2. *Restraint* (Sistem Penahan)
3. *Energy Management* (Manajemen Energi)
4. *Environment* (Lingkungan)
5. *Post-crash Factors* (Kondisi Setelah Tabrakan)

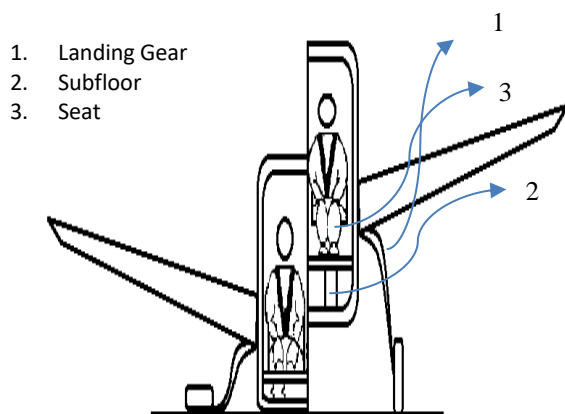
Container pada pesawat terbang merupakan struktur *fuselage* yang berfungsi sebagai kompartemen penumpang atau barang. Pada pesawat terbang, struktur *fuselage* tidak didesain sebagai bagian yang membangkitkan gaya angkat, melainkan sebagai bagian yang menampung beban berupa penumpang dan barang. Merujuk kepada fungsinya tersebut, maka *container* menjadi bagian paling penting untuk diperhatikan. *Container* harus didesain kuat dan tetap dapat memberikan ruang bertahan (survivable space) yang cukup untuk

penumpang selama kejadian tabrakan terjadi, sehingga kemungkinan cedera dan korban jiwa bisa diminimalisasi. Desain *container* sangat menentukan keberhasilan desain laik tabrak secara keseluruhan dari pesawat terbang, karena berhubungan langsung dengan penempatan penumpang.

Restraint merupakan sistem penahan penumpang di dalam *container* yang terdiri dari sabuk pengaman, tempat duduk, dan sambungan antara sistem penahan ke struktur utama. *Restraint* memiliki tiga fungsi utama. Fungsi pertama adalah untuk menyalurkan beban *inersia* dari tubuh penumpang. Melalui sistem penahan ini, maka beban *inersia* akan disalurkan kepada struktur rangka tubuh manusia yang lebih kuat sehingga jaringan-jaringan tubuh yang lebih lemah atau organ vital pada tubuh manusia bisa terlindungi selama tabrakan. Kedua, *restraint* berfungsi untuk menjaga gerakan penumpang selama peristiwa tabrakan terjadi, sehingga benturan dengan interior *container* bisa diminimalisir. Dengan adanya mekanisme ini maka interaksi antara penumpang dan komponen *restraint* lainnya seperti kantong udara (air bag) bisa dikontrol. Masalah yang paling utama dalam mendesain *restraint* ini adalah posisi penempatan dan kekuatan sambungan. Sambungan antar komponen sistem penahan seperti dari sabuk pengaman ke kursi penumpang menjadi sangat penting karena menjadi tumpuan selama proses penyaluran beban selama peristiwa tabrakan.

Energy management atau manajemen energi merupakan mekanisme pengelolaan energi tabrakan sehingga dapat disalurkan ke sistem-sistem penyerap energi tabrakan, yang pada akhirnya dapat mengurangi kemungkinan cedera atau meninggal pada penumpang. Manajemen energi tabrakan melibatkan berbagai sistem seperti tempat duduk penumpang, sistem penahan, dan *fuselage* sebagai ruang ditematkannya penumpang. Dua parameter yang harus dikontrol selama peristiwa tabrakan terjadi adalah perlambatan dan gaya. Parameter – parameter ini dapat dikendalikan dengan mengontrol deformasi yang terjadi pada struktur pesawat terbang. Gambar 3. memberikan gambaran tentang manajemen energi yang diterapkan pada suatu desain pesawat terbang ringan yang laik tabrak.

Pada Gambar 3. terlihat terdapat tiga sistem pada pesawat terbang yang difungsikan sebagai penyerap energi vertikal ketika pesawat mengalami kecelakaan. *Landing gear* sebagai penyerap energi tabrakan vertikal akan mengalami deformasi sehingga kecepatan tumbukan terhadap *fuselage* bisa berkurang. Energi tabrakan vertikal kemudian diteruskan ke sistem *subfloor* dari pesawat terbang. Pada bagian ini, struktur *subfloor* akan mengalami deformasi berupa tekuk progresif (*progressive buckling*) sehingga energi kinetik bisa diserap. Selanjutnya, energi kinetik tabrakan akan diserap pada kursi penumpang sehingga deselerasi bisa terkontrol. Dari gambaran ini terlihat bahwa manajemen energi tabrakan harus dirancang sedemikian rupa sehingga setiap komponen penyerap energi tabrakan bisa berfungsi secara komprehensif dan optimal sehingga ruang bertahan pada penumpang bisa dipertahankan.



Gambar 3 Manajemen energi vertikal pada pesawat terbang

Regulasi Kelaiktabrakan

Regulasi mengenai desain struktur laik tabrak untuk pesawat terbang kecil (*small airplane*) terdapat pada FAR Bagian 23 yang dirinci dalam paragraf 23.561 [4] tentang "Persyaratan Umum" dan 23.562 [5] mengenai "Kondisi Dinamik Mendarat Darurat".

Regulasi tersebut menyatakan bahwa dalam keadaan mendarat darurat sebuah pesawat terbang diizinkan untuk mengalami kerusakan, namun struktur harus didesain sedemikian rupa sehingga dapat menyerap energi tabrakan, sehingga penumpang tidak mengalami cedera yang serius pada saat terjadi kecelakaan. Di dalam regulasi juga disebutkan bahwa struktur

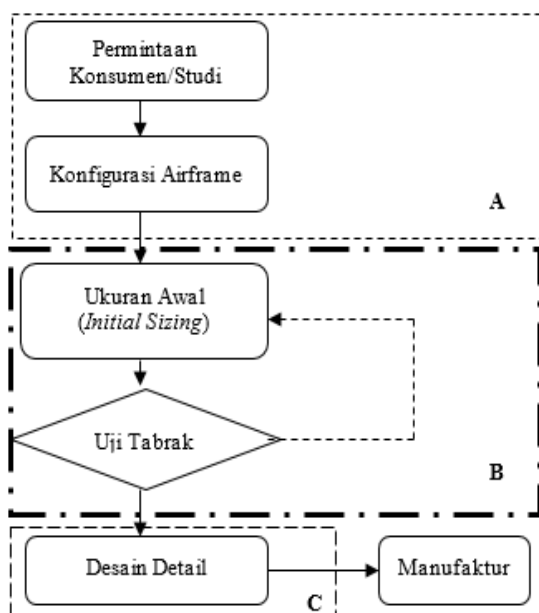
kursi penumpang tidak diperbolehkan untuk terlepas dari lantai ketika menerima beban tabrakan vertikal.

METODOLOGI

Desain kelaiktabrakan suatu struktur pada dasarnya harus terintegrasi didalam suatu proses desain pesawat terbang. Suatu desain pesawat terbang pada umumnya terdiri dari tiga tahapan yakni fase konsep desain (*conceptual design*), fase desain awal (*preliminary design*), dan fase desain detail (*detail design*). Merujuk kepada evaluasi tabrak (*crash evaluation*) dari *Institute of Structures and Design (DLR) German Aerospace Center (DLR)* [6], tahapan dari suatu evaluasi kemampuan struktur dalam kasus tabrakan berada pada fase desain awal sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4. Pada fase konsep desain konfigurasi *airframe* dari suatu pesawat terbang akan ditentukan. Konfigurasi ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan ukuran awal (*initial sizing*) dari struktur *airframe* pesawat terbang sehingga diperoleh distribusi ketebalan yang optimal. Tahapan selanjutnya adalah pada struktur *airframe* yang sudah memiliki distribusi ketebalan akan dilakukan pengujian dengan beban tabrakan (*crash load*) sehingga kemampuan penyerapan energi dari struktur *airframe* bisa diketahui. Disamping itu, parameter lain yang diperhatikan adalah deselerasi yang terjadi saat kejadian tabrakan yang akan terkait langsung dengan keselamatan dari penumpang. Pada tahap ini terdapat dua kemungkinan yang bisa terjadi, yakni struktur *airframe* memenuhi kriteria laik tabrak atau tidak memenuhi. Jika ditemukan suatu struktur *airframe* tidak memenuhi kriteria laik tabrak maka konfigurasi ini akan kembali kepada tahap ukuran awal (*initial sizing*) untuk dilakukan revisi terhadap distribusi ketebalan dari struktur *airframe* tersebut. Setelah suatu struktur *airframe* dinyatakan memenuhi kriteria laik tabrak melalui uji tabrak (*crash test*) maka selanjutnya konfigurasi ini akan memasuki fase desain detail. Tahapan desain detail merupakan fase terakhir dari suatu proses desain pesawat terbang sebelum dilakukan proses manufaktur.

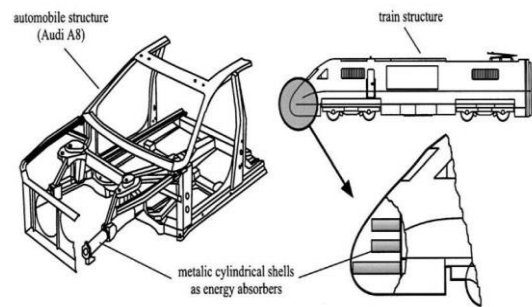
Evaluasi kelaiktabrakan (*crashworthiness*) dari suatu struktur pesawat terbang dilakukan

melalui *vertical drop test*. Parameter penting yang akan dievaluasi meliputi respon dari struktur pesawat (deformasi) dan percepatan vertikal dari penumpang yang memungkinkan terjadinya cedera tulang belakang dan organ dalam [6]. Struktur akan menyerap energi kinetik dan mengubahnya menjadi deformasi plastis sehingga jumlah yang diteruskan ke kabin penumpang bisa berkurang. Pengurangan penjaralan energi kinetik ke kabin akan berdampak pada pengurangan percepatan vertikal yang dirasakan oleh penumpang. Hal ini merupakan tujuan yang ingin dicapai dalam suatu desain struktur terkait kelaiktabrakan, dimana struktur memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap energi tabrakan dan terjaminnya keselamatan dari penumpang.



Gambar 4 Proses Desain Pesawat Terbang, (A) Konsep desain, (B) Desain awal, (C) Desain detail

Crash box merupakan komponen struktur yang dipasang pada sistem *subfloor* pesawat terbang yang berfungsi untuk menyerap energi kinetik tabrakan dari pesawat terbang melalui deformasi. Komponen ini sangat banyak dikembangkan dan telah diaplikasikan pada berbagai jenis kendaraan seperti mobil, kereta api, pesawat terbang, dan helikopter seperti pada Gambar 5. *Crash box* telah menjadi bagian dalam strategi pengembangan struktur laik tabrak saat ini.



Gambar 4 Penggunaan crash box pada mobil dan kereta, [7]

Selanjutnya, evaluasi kelaiktabrakan pada pesawat terbang tidak hanya terbatas pada kasus vertikal namun juga horizontal. Kasus percepatan horizontal seringkali terjadi pada kejadian pendaratan di air (*ditching*) and kegagalan pada roda pendarat depan (*nose landing gear*). Percepatan horizontal yang dialami oleh penumpang selama kejadian tumbukan pada pesawat terbang sangat terkait dengan salah satu kriteria penting dalam evaluasi kelaiktabrakan struktur, yakni *Head Injury Criteria* (HIC) [6]. Percepatan horizontal akan menyebabkan pergerakan atau *defleksi* pada organ kepala penumpang yang selanjutnya bisa menimbulkan cedera bahkan kematian. Kombinasi antara sistem penahan dan desain kursi penumpang menjadi kunci dalam mengatasi masalah ini. Metode yang digunakan untuk evaluasi desain struktur laik tabrak adalah melalui *sled test* [6].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Strategi Kelaiktabrakan

Dalam industri pesawat terbang, perhatian yang intensif diberikan kepada desain keselamatan struktur airframe. Hal tersebut dilakukan untuk membatasi kerusakan dalam kasus tabrakan khususnya akibat hantaman pada bagian bawah *fuselage* disamping juga untuk meminimalisir efek cedera pada penumpang.

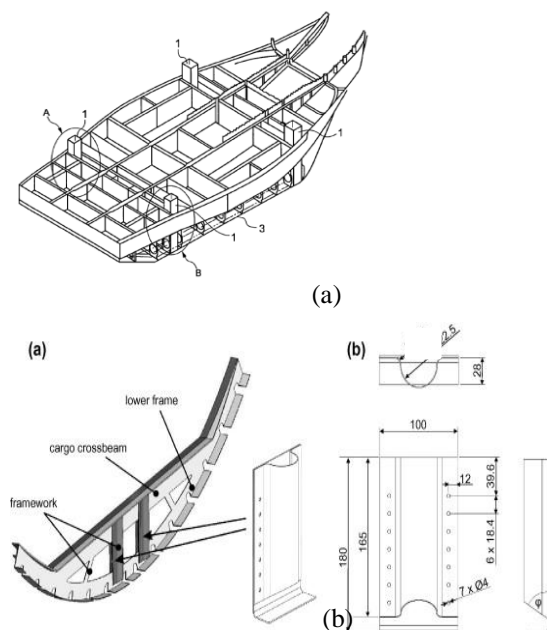
Struktur *subfloor* pada *airframe* pesawat terbang memainkan peranan penting dalam desain keselamatan tersebut. Pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa struktur *subfloor* terletak pada *airframe*, di antara panel lantai dan kulit bawah *fuselage*. Pada saat terjadi kecelakaan/benturan, struktur *subfloor* tersebutlah yang dikorbankan untuk menyerap

energi kinetik. Gambar 5 menampilkan salah satu contoh kejadian kecelakaan pesawat dengan bagian *subfloor* yang mengalami deformasi.



Gambar 5 Kecelakaan pesawat [8]

Struktur *subfloor* konvensional dirancang dengan asumsi bahwa benturan yang akan terjadi pada suatu kecelakaan pesawat terbang saat melakukan pendaratan darurat adalah dalam bentuk pembebanan aksial atau berupa benturan dalam arah vertikal. Salah satu komponen utama yang merupakan bagian utama dari struktur *subfloor* adalah *crash box*. Gambar 7. menunjukkan penggunaan *crash box* pada penahan benturan pada helikopter. Pada saat terjadi kecelakaan/benturan, *crash box* akan berfungsi untuk menyerap energi kinetik akibat benturan dengan cara mengubahnya menjadi energi deformasi permanen dalam arah longitudinalnya.



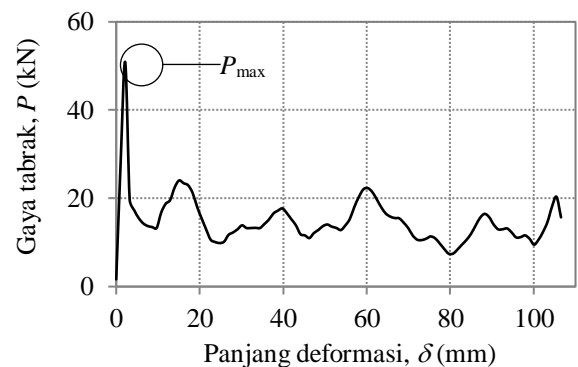
Gambar 6 Struktur *crushable subfloor* dan *crash box*, (a) helikopter, (b) pesawat terbang [10]

Parameter Kelaiktabrakan

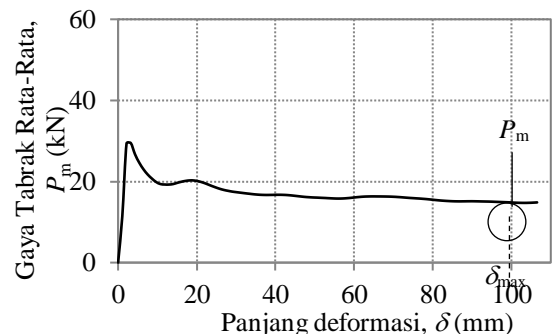
Respon tabrakan pada struktur *crash box* yang ditampilkan pada Gambar 8. dapat di evaluasi dengan menggunakan beberapa parameter yang disebut dengan parameter kelaiktabrakan (*crashworthiness parameter*) yang meliputi energi kinetik yang diserap (EA), gaya tabrak maksimum (P_{max}), gaya tabrak rata-rata (P_{mean}), penyerapan energi spesifik (SEA), peningkatan efisiensi struktur dalam menyerap energi (CFE), dan modulus deformasi plastis. Parameter-parameter tersebut selanjutnya dapat dihitung menggunakan Persamaan (1), (2), (3).

Gaya tabrak rata-rata (P_m) merupakan parameter untuk mengetahui besarnya energi yang diserap melalui deformasi yang terjadi pada *crash box* dan dapat di hitung dengan cara merata-ratakan harga gaya tabrak (P) pada setiap perubahan panjang deformasi (δ). Persamaan (1) berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan harga P_m .

$$P_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \quad (1)$$



(a)



(b)

Gambar 7 Kurva respon tabrak struktur *crash box*, (A) Gaya tabrak (B) Gaya tabrak rata-rata, terhadap panjang deformasi

Efektivitas suatu struktur dalam hal penyerapan energi dapat dinyatakan menggunakan parameter penyerapan energi spesifik (SEA) dan efisiensi struktur dalam menyerap energi (CFE) yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

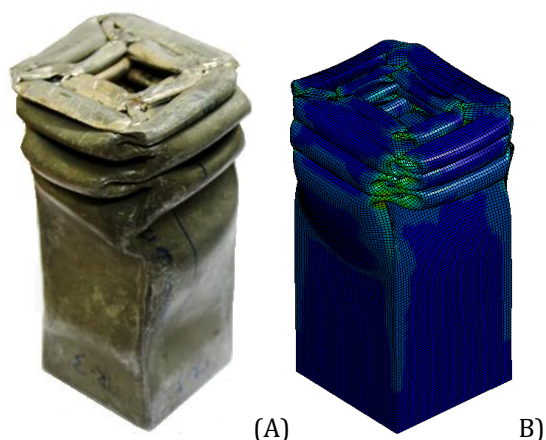
$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

dimana m adalah massa tabung yang terdeformasi, dan P_{max} adalah gaya puncak yang merupakan inisiasi terjadinya tekuk lokal yang ditandai dengan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk terjadinya lipatan pertama.

Penelitian Penyerapan Energi *Crash box*

Karakteristik penyerapan energi *crash box* ketika menerima beban tabrak telah banyak diteliti [11-15]. Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, saat ini tengah melakukan penelitian tentang berbagai konfigurasi *crash box* yang menerima beban tumbukan aksial secara analitik dan numerik yang divalidasi melalui eksperimen, guna mendapatkan prosedur dan parameter penting dalam mendesain *crash box* [11]. Gambar 9 merupakan salah satu contoh penyerapan energi akibat benturan arah aksial pada struktur *crash box* bersel jamak [11].



Gambar 8 Modus deformasi struktur *crash box* berdinding jamak (A) Hasil eksperimen, (B) Simulasi numerik [11]

Pemahaman tentang fenomena, metode dan manajemen penyerapan energi akibat tabrakan pada pesawat merupakan penelitian yang penting, terlihat dari tingginya jumlah penelitian dasar tentang mekanisme fenomena tumbukan. Begitu pula dengan pemahaman regulasi mengenai kelaiktabrakan struktur akan sangat bermanfaat dalam berbagai kegiatan rancang bangun struktur pesawat terbang di Indonesia.

KESIMPULAN

Kajian tentang kelaiktabrakan pesawat terbang yang mencakup kondisi penerbangan, desain, dan strategi kelaiktabrakan sudah dilakukan. Desain kelaiktabrakan struktur pesawat terbang merupakan proses yang terintegrasi dalam suatu proses desain pesawat secara keseluruhan. *Crash box* sebagai komponen subfloor pada pesawat terbang menjadi bagian dari strategi untuk mendapatkan desain struktur yang laik tabrak pada pesawat terbang.

DAFTAR PUSTAKA

- UU No. 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan.
- T. R. Hurley, J. M. Vandenburg, *Small airplane crashworthiness design guide*, Simulia (2002).
- FAR Part 25.561, *Emergency landing conditions*.
- FAR Part 25.562, *Emergency landing dynamic conditions*.
- D. B. Schwainn, D. Kohlgruber, J. Scherer, M. H. Siemann, *A parametric aircraft fuselage model for preliminary sizing and crashworthiness applications*, Aeronaut J., (2016).
- Marsolek, J., and Reimerdes, H.G. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, 1209–23, 2004.
- Hayashi. *Impact Resistant Structure for the Helicopter and Energy Absorber Used for the Same*. US Patent, US006959894B2, Nov 2005.
- M. Waimer, D. Kohlgruber, D. Hachenberg, H. Voggenreiter, Experimental study of CFRP components subjected to dynamic crash loads, *Composite Structures*, Vol. 105, Nov 2013.

- A. Jusuf, T. Dirgantara, L. Gunawan, I. S. Putra. Crashworthiness Analysis of Multi-Cell Prismatic Structures. *International Journal of Impact Engineering* Vol. 78, pp. 34-50, 2015.
- Nguyen Chanh Nghia, Tatacipta Dirgantara, Sigit P. Santosa, Annisa Jusuf, Ichsan Setya Putra, Impact Behavior of Square Crash Box Structures Having Holes at Corners. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 660, pp.613-617, 2014.S.
- Agustinus Dimas, Tatacipta Dirgantara, Leonardo Gunawan, Annisa Jusuf, Ichsan Setya Putra, The Effects of Spot Weld Pitch to the Axial Crushing Characteristics of Top-Hat Crash box. *Applied Mechanics and Materials* Vol.660, pp. 578-582, 2014.
- Leonardo Gunawan, Annisa Jusuf, Tatacipta Dirgantara, Ichsan Setya Putra. Experimental Study on Axial Impact Loading of Foam Filled Aluminum Columns. *Journal of KONES Power Train and Transport*, Vol. 20 No. 2, pp. 150 – 157, 2013.
- M. Mora, A. Jusuf, T. Dirgantara, L. Gunawan, I.S. Putra: Low Velocity Impact Analysis of Foam-Filled Double-Walled Prismatic Columns. *Proceeding of The International Conference on Advances in Mechanical Engineering* 2009, Shah Alam, Malaysia, June 24 – 25, 2009.
- http://wqow.images.worldnow.com/images/15000164_BG2.JPG.
- <http://www.bps.go.id> (diakses pada januari 2016).